



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.07.2024
Kabul Tarihi : 21.08.2024

Received Date : 18.07.2024
Accepted Date : 21.08.2024

ÇORAP BOYAMA ATIKSULARININ FENTON VE ELEKTRO-FENTON PROSESLERİ İLE ARITIMI

TREATMENT OF SOCK DYEING WASTEWATER BY FENTON AND ELECTRO-FENTON PROCESSES

İbrahim YOKSULABAKAN¹ (ORCID: 0000-0002-5875-3350)

Özgecan MADENLİ¹ (ORCID: 0000-0002-8673-3963)

Ece Ümmü DEVECİ^{1*} (ORCID: 0000-0002-7551-188X)

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ece Ümmü DEVECİ, ecedeveci@gmail.com

ÖZET

Tekstil endüstrisi hem dünya genelinde hem de Türkiye'de sürekli olarak gelişmekte olan bir sektördür ve üretim kapasitesi her geçen gün artmaktadır. Ancak bu büyüme artan atıksu problemini de beraberinde getirmektedir. Üretim süreci sonrasında ortaya çıkan atıksular, kullanılan kimyasallara ve boyalara bağlı olarak kirlilik derecesi değişkenlik göstermektedir. Bu atıksular genellikle renkli, yüksek organik içerikli ve biyolojik olarak parçalanması zor bileşenler içermektedir. Bu çalışma, bir tekstil fabrikasından alınan çorap boyama atıksularının klasik Fenton (KF) ve elektro-fenton (EF) prosesleri ile arıtılabilirliğini incelemektedir. Çalışmada KF ve EF proseslerinin arıtma verimliliği, renk ve KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) giderimine etkisi değerlendirilmiştir. KF prosesinde zaman, Fe⁺² ve H₂O₂ konsantrasyonunu parametrelerin etkisi, EF prosesinde ise zaman, voltaj, H₂O₂ konsantrasyonu ve elektrotlar arası mesafe parametrelerin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, KF prosesi için %96 KOİ ve %75 renk giderim, EF prosesi için %99 KOİ giderimi ve %85 renk giderimi sağlanmıştır. Bu bulgular, EF prosesinin daha etkili bir çözüm olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak KF prosesi yüksek KOİ giderimi sağlasa da renk gideriminde yetersiz kalmaktadır. Buna karşılık EF prosesi daha etkili bir şekilde atıksuların arıtılmasını sağlamaktadır. Bu çalışma, çorap boyama atıksularının arıtımında EF prosesinin önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çorap boyama atıksuları, fenton, elektro-fenton, kimyasal oksijen ihtiyacı, renk

ABSTRACT

The global textile industry, including Turkey, is continuously expanding, leading to an increase in production capacity and consequently, a rise in wastewater generation. The pollution levels in this wastewater depend on the chemicals and dyes used in the manufacturing process. Typically, textile wastewater is colored, has high organic content, and contains components that are challenging to degrade biologically. This study investigates the treatability of wastewater from a textile factory's sock dyeing process using conventional Fenton (CF) and electro-Fenton (EF) processes. The study focuses on the effectiveness of these processes in removing color and chemical oxygen demand (COD) from the wastewater. Key parameters such as time, Fe⁺² concentration, and H₂O₂ concentration were analyzed in the CF process, while the EF process examined the effects of time, voltage, H₂O₂ concentration, and electrode distance. The results showed that the CF process achieved 96% COD and 75% color removal, whereas the EF process achieved superior results with 99% COD and 85% color removal. These findings suggest that the EF process is a more effective method for treating textile wastewater, particularly in terms of color removal. This study highlights the significant potential of the EF process in improving wastewater treatment efficiency in the textile industry.

Keywords: Sock dyeing wastewater, fenton, electro-fenton, chemical oxygen demand, color

GİRİŞ

Tekstil endüstrisi, küresel ekonomide önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, tekstil endüstrisi en büyük atıksu üreten endüstrilerden biridir. Günde 8000 kg ürün üreten bir tekstil üretim birimi yaklaşık 1,6 milyon litre su tüketmektedir (Alkaya & Demirer, 2014). Bu su tüketiminin yaklaşık %25'i baskı ve boyama işlemlerinden kaynaklanmaktadır (Raja vd., 2019). Ayrıca USEPA'ya göre, 1 kg kumaşı boyamak için 40 litre su gereklidir. Ancak bu miktar işlem türü ve tekstil malzemesinin değişimi gibi faktörlere bağlıdır (Ćurić vd., 2021). Öte yandan, tekstil üretiminde boyama işlemlerinden kaynaklanan tekstil atıksuyu çevre için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Uddin, 2021). Boyama işlemlerinden kaynaklanan tekstil atıksuları genellikle çeşitli boyalar, yardımcı kimyasallar, yüzey aktif maddeler ve tuzlar içermektedir (Kishor vd., 2021). Bu bileşenleri içeren tekstil atıksuları, alıcı ortama girdiğinde çevrede kalarak biyotik ve abiyotik bileşenler için toksisitesine yol açmaktadır (Uddin, 2021).

Geleneksel tekstil atıksuyu arıtma süreçleri bu kirleticileri gidermek için genellikle yetersiz kalmaktadır ve bu da ileri arıtma teknolojilerine olan ihtiyacı arttırmaktadır (Azanaw vd., 2022). Son yıllarda, ileri oksidasyon süreçlerinin (AOP) tekstil atıksuyu arıtımında özellikle boyar madde içeren atıksuların arıtımı için umut verici ve kanıtlanmış bir yaklaşımdır (Paździor vd., 2019). AOP'lar arasında KF ve EF süreçleri, basit, hem de kısmi mineralizasyon sağlamaları, toksisiteyi azaltmaları ve atıksuyun biyolojik bozunabilirliğini artırmaları nedeniyle özel bir ilgi görmektedir (Pelalak vd., 2023). Fenton süreçlerinde, demir iyonlarının (Fe^{+2}) hidrojen peroksit (H_2O_2) ile reaksiyonu sonucu son derece reaktif hidroksil radikalleri (OH^\bullet) oluşmaktadır (Luo vd., 2022). Ayrıca, çeşitli organik bileşiklerin bozunması için büyük bir potansiyele sahiptir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Kuleyin vd., (2021) tarafından yapılan çalışmalarda, grafit elektrotlarla biyolojik olarak arıtılmış tekstil atıksularının ileri arıtımında EF teknolojisinin etkinliği araştırılmıştır. Sonuçlarında, grafit anot ve katot ile EF sürecinin, optimal işletme koşulları altında %89 renk, %93 KOİ ve %58 TOC giderim verimliliği sağlayarak atıksu kalitesini iyileştiren ve suyun yeniden kullanımı için uygun hale getiren bir teknoloji olduğunu bildirmişlerdir. Sobczak vd., (2024), KF ve EF işlemlerinin tekstil atıksularının yeniden kullanımı için arıtımından sonra yan ürünlerin giderimi ve biyolojik bozunabilirliklerini araştırmışlardır. Başka bir çalışmada ise gerçek tekstil atıksuyunun EF ile bozunma performansı, atık biyokütleden modifiye edilmiş biyokömür elektrotlar kullanılarak araştırılmıştır (Temur Ergan vd., 2023). İncelenen literatür çalışmaları KF ve EF proseslerinin farklı elektrotlarla daha efektif ve yüksek verim elde edilmek için hala araştırmaların devam ettiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, çorap boyama atıksularının arıtımında KF ve EF süreçlerinin etkinliği araştırılmış ve çorap boyama atıksularındaki organik boyalar ve diğer kirleticilerin giderim verimliliği değerlendirilmiştir. KF süreci için zaman, H_2O_2 ve Fe^{+2} konsantrasyonu etkisi araştırılırken EF süreci için ise H_2O_2 konsantrasyonu, elektrotlar arası mesafe, zaman ve voltaj parametrelerinin süreç verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca çorap boyama atıksularının arıtımı için KF ve EF prosesleri için optimum işletme koşulları belirlenmiştir.

MATERYAL ve METOT

Malzemeler

Çorap boyama atıksuyu, Kayseri Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan çorap üretim fabrikasından temin edilmiştir. Temin edilen atıksuyun fizikokimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Örnekler, analiz dönemine kadar $+4^\circ C$ sıcaklıkta ve karanlıkta saklanmıştır. Çalışmada, demir (II) sülfat heptahidrat ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, Merck), hidrojen peroksit (H_2O_2 %30, Merck), sülfürik asit (H_2SO_4 %95, Merck), pH metre (WTW Multi 9620 IDS), dijital manyetik karıştırıcı (IKA manyetik karıştırıcı), santrifüj (Thermo Scientific Sl 16) ve bir termoreaktör kullanılmıştır.

Tablo 1. Çorap Boyama Atıksuyunun Fizikokimyasal Özellikleri

Parametre	Değer
pH	6,39
KOİ (mg/L)	5330
İletkenlik (us/cm)	227
Bulanıklık (NTU)	105
Renk, absorbans (nm)	420

KF Prosesi

KF prosesi için pH, zaman, Fe⁺² ve H₂O₂ konsantrasyonu önemli parametrelerdir. Özellikle pH parametresi demir ve hidrojenin türleşmesi nedeniyle dikkate alınması gereken bir faktördür. İncelenen literatür çalışmalarına göre, KF süreç reaksiyonları için optimum pH aralığı 2,5-3'tür (Kaur vd., 2018; Ramirez-Pereda vd., 2020) Çorap boyama atıksuyunun KF ile arıtımı için belirlenen parametre aralıkları şunlardır: Karıştırma hızı = 200 rpm, zaman = 15, 30, 45, 60, 75, 90 ve 120 dakika, pH = 3, V = 500 mL, H₂O₂ konsantrasyonu = 25, 50, 100 ve 150 mL/L ve Fe⁺² = 0,50, 1, 2,5 ve 5 g/L.

EF Prosesi

Çorap boyama atıksuyunun EF prosesi için bir deneysel düzenek hazırlandı. Deneyler, 500 ml aktif hacme sahip bir cam beherde (10,5 cm (çap) × 14,5 cm (derinlik)) gerçekleştirildi. Kullanılan demir elektrotların tamamı 6,0 cm × 8,5 cm (genişlik × yükseklik) yüzey alanına sahip olup, her iki elektrot da aynı boyut ve 1 mm kalınlıktadır. EF prosesinin zaman, voltaj ve H₂O₂ konsantrasyonu açısından optimize edilmesi için deneyler yapıldı. EF reaktörünün işletme koşulları: hacim 500 mL, karıştırma hızı = 200 rpm, pH = 3, zaman = 15, 30, 45, 60 ve 120 dakika, elektrotlar arası mesafe = 1, 2 ve 3 cm, voltaj = 10, 20 ve 30 V ve H₂O₂ konsantrasyonu = 10, 20 30, 40 ve 50 mL/L. Atıksuyun pH'ını ayarlamak için 1 M H₂SO₄ çözeltisi kullanıldı. pH istenen işletme koşullarına ayarlandıktan sonra, elektrot çiftlerinin bağlandığı sisteme H₂O₂ dozajlanarak sistem başlatıldı. Reaksiyon süresi boyunca belirli aralıklarla numuneler alındı. Reaksiyonu durdurmak için toplanan numunelere sodyum tiyosülfat eklendi. Daha sonra numuneler, toplanan numunelerdeki demir partiküllerini çöktürmek için 9000 rpm'de 15 dakika santrifüj edildi. Arıtma verimliliği, santrifüjden sonra berrak fazdaki numunelerin KOİ ve renk analizi incelenerek test edildi.

Analitik Metotlar

Atıksu ve arıtılmış atıksu numunelerindeki KOİ konsantrasyonları, Standart Metotlara (APHA, 1995) göre analiz edilmiştir. Sürecin sonuçları, yüzde giderim fonksiyonu olarak, denklem (1) ile hesaplanmıştır:

$$\% \text{ KOİ Giderimi} = \frac{\text{KOİ}_{\text{giriş}} - \text{KOİ}_{\text{çıkış}}}{\text{KOİ}_{\text{giriş}}} * 100 \quad (1)$$

Atıksuyun ve arıtılmış atıksu numunelerin rengi, UV-VIS spektrofotometre kullanılarak absorpsiyon yöntemiyle belirlenmiştir. Spektrofotometrede 300–800 nm aralığında tarama yapılmış ve en uygun absorpsiyon değeri 420 nm olarak ayarlanmıştır. KF ve EF reaksiyonu süresince 10 mL hacminde toplanan numuneler filtrelenmiştir. Daha sonra, 4 mL'lik spektrofotometre küvetlerine doldurulmuş ve 420 nm dalga boyunda absorpsiyon değerleri okunmuştur. Renk giderim verimliliği, denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\% \text{ Renk Giderimi} = 1 - \frac{A_t}{A_0} * 100 \quad (2)$$

A₀: atıksuyun absorpsiyon değerini, A_t ise arıtılmış suyun absorpsiyon değerini göstermektedir.

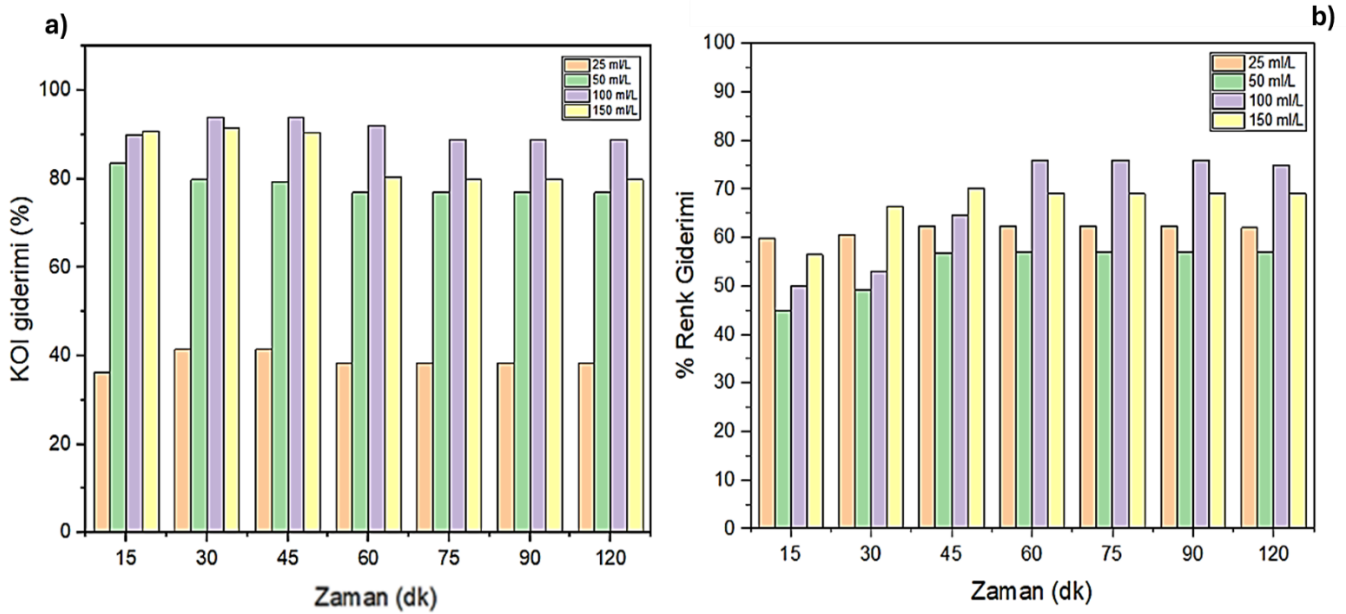
BULGULAR ve TARTIŞMA

KF Prosesi

H₂O₂ Konsantrasyonu Etkisi

KF sürecinde üretilen OH• radikallerinin en önemli kaynağı H₂O₂'dir. Reaksiyon çözeltisinde fazla H₂O₂ bulunması atıksuyun KOİ değerini artırmaktadır. Fakat H₂O₂ konsantrasyonunun çok yüksek olması işletme maliyetlerini de etkilemektedir (Ramos vd., 2021). Bu nedenle, KF prosesinde H₂O₂'nin optimizasyonu önemlidir. Farklı konsantrasyonlarda H₂O₂ eklenerek KF oksidasyon sürecinde optimizasyon için deneysel çalışmalar yapılmıştır. H₂O₂ konsantrasyonunu optimize etmek için reaktörün işletme koşulları: H₂O₂ konsantrasyonu 25, 50, 100, 150 mL/L, pH = 3, karıştırma hızı = 200 rpm, Fe⁺² konsantrasyonu = 2,5 g/L ve süre = 15-120 dakikadır. Şekil 1, H₂O₂ konsantrasyonunun KOİ ve renk giderimi üzerindeki etkilerini göstermektedir. H₂O₂ konsantrasyonu 150 mL/L'ye yükseldiğinde KOİ giderim verimliliği %80'in üzerine çıkarken, H₂O₂ konsantrasyonu 50 mL/L'nine altına düştüğünde KOİ giderim verimliliği azalmıştır. (Şekil 1a). H₂O₂ konsantrasyonu arttıkça, ortamda OH• radikallerinin artması nedeniyle KOİ giderim verimliliği yükselmiştir. Ortamdaki tüm OH• radikallerinin kullanılması ve arıtılmış suda OH• radikallerinin bulunmaması alıcı ortamda biyolojik bozunma için önemlidir. En yüksek KOİ giderim verimliliği (%92) 100 mL/L H₂O₂ konsantrasyonunda gözlemlenmiştir. Ayrıca, süreç 45. dakikada maksimum

giderim verimliliğine ulaşmıştır. Şekil 1b'de ise H₂O₂ konsantrasyonuna bağlı olarak renk giderim verimliliği verilmiştir. Renk giderimi 100 mL/L H₂O₂ konsantrasyonunda %75 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 1. H₂O₂ Konsantrasyonunun a) KOİ ve b) Renk Giderimi Üzerine Etkisi

Fe⁺² Konsantrasyonunun Etkisi

KF oksidasyonunda reaktifin dozu organik maddenin bozunmasında önemlidir. Genel olarak, organik maddenin parçalanma hızı, Fe⁺² dozajının artmasıyla artmaktadır. Fe⁺² yokluğunda, ortamda OH• radikalleri oluşturmak için temel bir faktör bulunmadığından, fenton reaksiyonuna dayalı etkili bir oksidasyon gerçekleşmez. Fe⁺² konsantrasyonu ne kadar yüksek olursa, teorik olarak o kadar fazla OH• radikali oluşmaktadır (GilPavas vd., 2017). Ancak, reaksiyonda fazla miktarda Fe⁺² iyonu, çözünmüş toplam demir konsantrasyonunu artırmakla kalmaz, aynı zamanda çamur oluşumuna da yol açmaktadır (Karthikeyan, vd., 2011). Bu durum, süreç maliyetleri üzerinde de olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, Fe⁺² konsantrasyonunu, radikallerle reaksiyona girecek şekilde ayarlamak ve optimize etmek önemlidir. Çorap boyama atıksuyunun KF oksidasyonunda Fe⁺² konsantrasyonunu optimize etmek için reaktörün işletme koşulları: Fe⁺² konsantrasyonu 0,5, 1, 2,5 ve 5 g/L, pH = 3, karıştırma hızı = 200 rpm, H₂O₂ konsantrasyonu = 100 mL/L ve zaman = 15-120 dakikadır. Şekil 2 Fe⁺² konsantrasyonunun zamana bağlı olarak KOİ ve renk giderimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, KOİ giderim verimliliğinin artan Fe⁺² konsantrasyonuyla arttığını göstermektedir. 45. dk'da Fe⁺² konsantrasyonu 5 g/L olduğunda %96 KOİ giderimi gözlemlenmiştir (Şekil 2a).

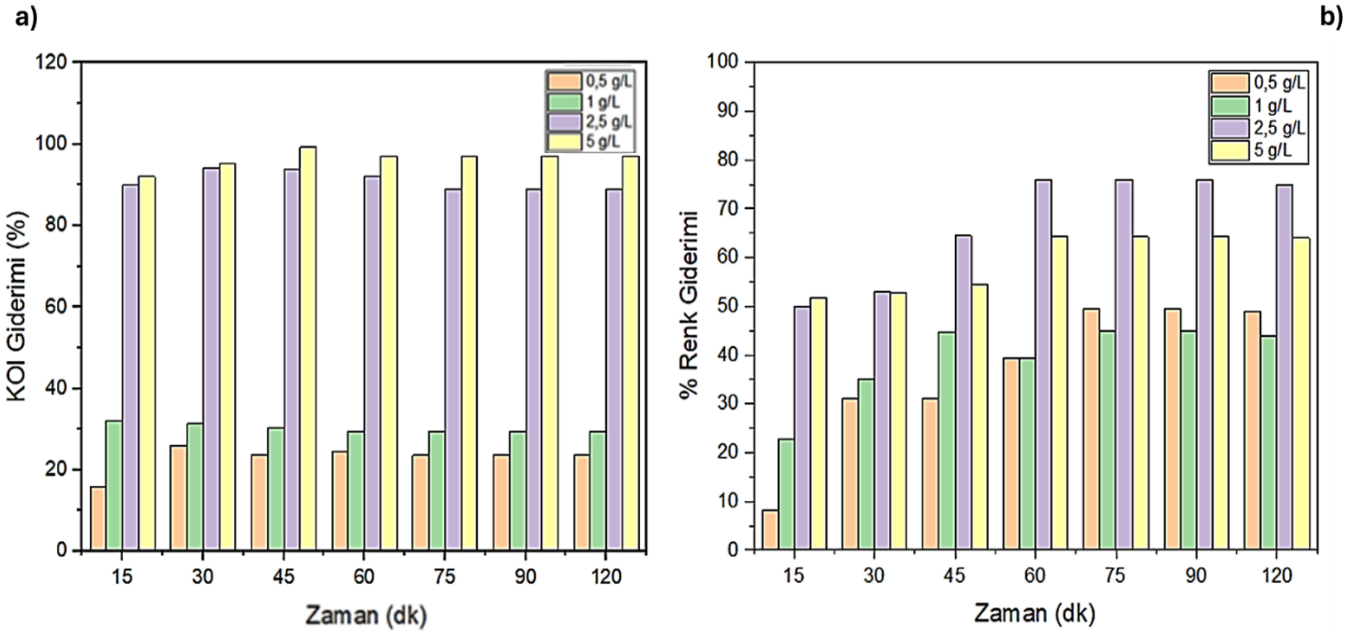
KF prosesinde Fe⁺² konsantrasyonunun renk giderimi üzerindeki etkisi Şekil 2b'de gösterilmiştir. 5 g/L Fe⁺² konsantrasyonunda %96 KOİ giderimi gözlemlenirken, 2,5 g/L Fe⁺² konsantrasyonunda renk giderimi %75 olarak gözlemlenmiştir. Fe⁺² konsantrasyonu ne kadar yüksek olursa, teorik olarak o kadar fazla OH• radikali oluşmaktadır. Bu durum KOİ giderimi üzerinde olumlu bir etkiye sahipken, renk giderimi sırasında Fe⁺² iyonlarının aşırı çözünmesi rengi dolayısıyla renk parametresi üzerinde olumsuz bir etkiye yaratmaktadır.

EF Prosesi

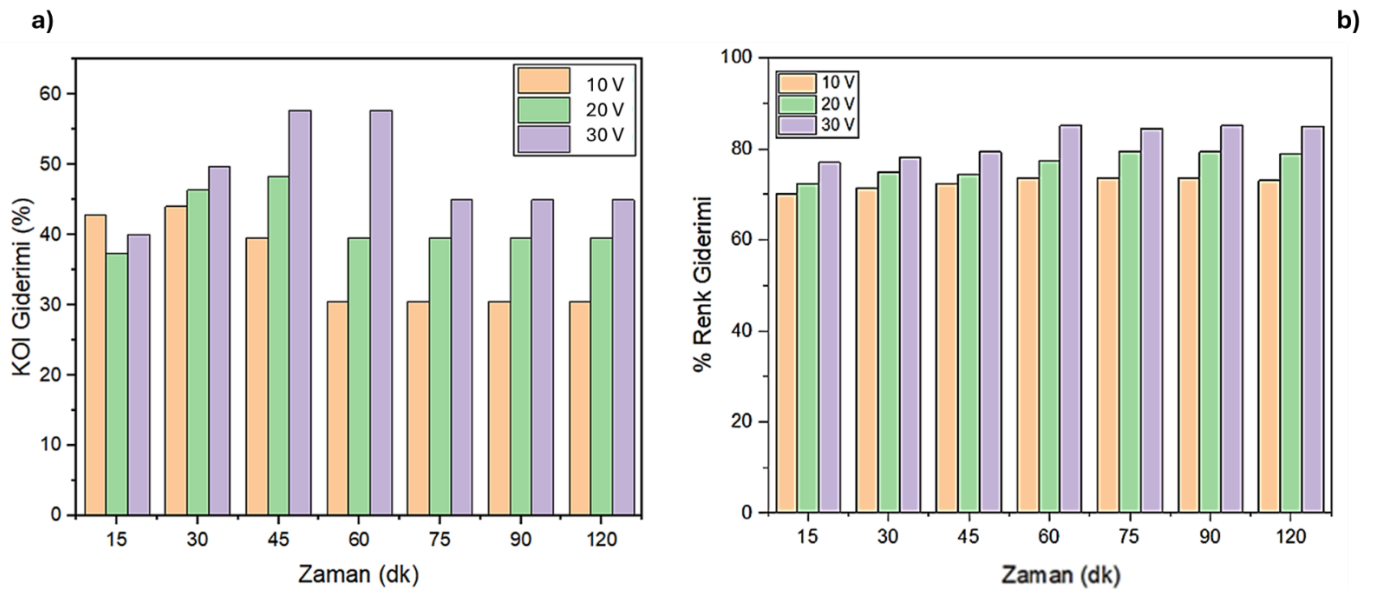
Voltajın Etkisi

EF prosesi ile çorap boyama atıksuyunun arıtımında zaman, elektrotlar arası mesafesi, voltaj ve H₂O₂ konsantrasyonu parametrelerinin etkileri araştırılmış ve optimize edilmiştir. EF prosesinin en önemli işletme parametrelerinden biri, elektrotlara uygulanan voltaj seviyesidir. Çorap boyama atıksuyunun KOİ değeri ve renk giderim verimliliği üzerindeki uygulanan voltajın etkisini araştırmak amacıyla, 10 ile 30 V arasında çalışılmıştır. Voltaj optimizasyonu için reaktör işletme koşulları: hacim = 500 mL, voltaj = 10 V, 20 V, 30 V, pH = 3, karıştırma hızı = 200 rpm, H₂O₂ konsantrasyonu = 20 mL/L'dir. Şekil 3a, uygulanan voltajın 10V'den 30 V'e çıkarılmasının KOİ giderim verimliliğini %40'tan %57'ye yükselttiğini göstermektedir. Benzer sonuçlar Panizza ve Cerisola, (2009) tarafından yapılan çalışmada da

gözlemlenmiştir. Ancak, voltajın 45. dakikadan sonra yüksek giderim verimliliğinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu nedenle, EF süreci için optimum zaman, KF oksidasyonunda olduğu gibi 45 dakika olarak belirlenmiştir. Voltaj arttıkça, KOİ giderim verimliliği de artmaktadır. Bu durum, anottan Fe^{+2} iyonlarının salınmasına yol açan reaksiyonlara bağlanabilir; Faraday kuralı dikkate alındığında, demir iyonlarının sayısı zaman ve akım ile birlikte artmaktadır (Santana-Martínez vd., 2016). Zaman ve voltaj arttıkça, üretilen demir iyonlarının sayısının, hidrojen peroksit ile reaksiyona girecek miktarla orantılı veya daha fazla olacağı varsayılmaktadır. EF süreci için optimum voltaj 30 V olarak belirlenmiştir. Uygulanan voltajın renk giderimi üzerindeki etkisi Şekil 3b'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi KOİ giderimi arttıkça renk giderimi de artmaktadır. Voltaj 10 V'dan 30 V'a çıkarıldığında, renk giderimi %70'ten %85'e yükselmiştir. Deneysel, voltajın artırılmasının renk giderimini hızlandırdığını göstermiştir. Ayrıca, voltajın artırılması her iki parametre için de giderim performansını artırmıştır.



Şekil 2. Fe²⁺ Konsantrasyonunun a) KOİ ve b) Renk Giderimi Üzerine Etkisi

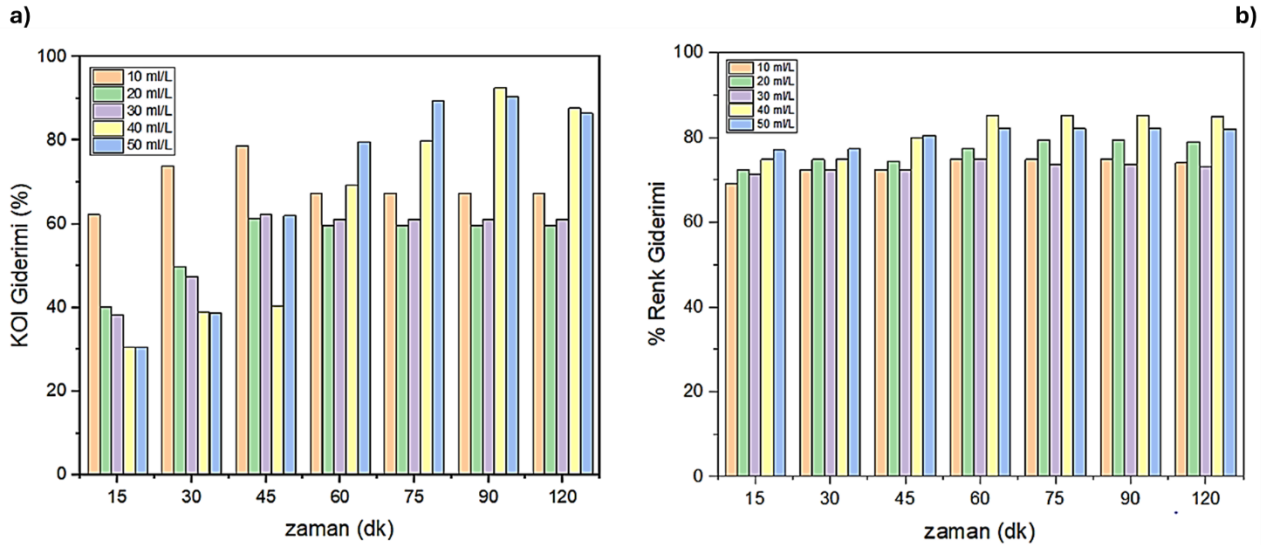


Şekil 3. Voltajın a) KOİ ve b) Renk Giderimi Üzerine Etkisi

H₂O₂ Konsantrasyonunun Etkisi

H₂O₂ konsantrasyonu, EF prosesinin en önemli parametrelerinden biridir. Deneysel çalışmada, H₂O₂ konsantrasyonunun KOİ ve renk giderim verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla 10, 20, 30, 40 ve 50

mL/L H₂O₂ konsantrasyon aralığı belirlenmiştir. H₂O₂ optimizasyonu için işletme koşulları: pH = 3, karıştırma hızı = 200 rpm, hacim = 500 mL, V = 30 V, zaman = 15-120 dakikadır. Şekil 4a'da H₂O₂ konsantrasyonunun KOİ giderim verimliliği üzerindeki etkisi gösterilmektedir. H₂O₂ konsantrasyonu 10 mL/L'den 50 mL/L'ye artırıldığında, KOİ giderimi %60'tan %90'ın üzerine ulaşmıştır (Şekil 4a). Optimum H₂O₂ konsantrasyonu 40 mL/L olarak belirlenmiş ve %95 KOİ giderimi sağlanmıştır. Daha fazla miktarda H₂O₂ eklenmesi ile giderim verimliliği azalmaktadır. Fenton reaksiyonuna göre H₂O₂ konsantrasyonu arttıkça, ortamda hidroksil radikallerinin seviyesi artar ve buna bağlı olarak bozunma derecesi ve giderim verimliliği artmaktadır. Ayrıca Fenton reaksiyonuna göre H₂O₂ konsantrasyonunun artmasıyla ortamdaki hidroksil radikalının seviyesi artmaktadır. Bunu bağlı olarak bozunma derecesi ve giderim etkinliği de artmaktadır. Dahası fazla oranlarda H₂O₂ dozlaması, radikal temizleyici rolüne sahiptir. Ek olarak burada hidroksil radikaliyle reaksiyona girerek, daha düşük reaktiviteye sahip olan ve organik bileşiklerin bozunmasında hiçbir rolü olmayan hidroksil radikalının üretimiyle sonuçlanmaktadır (Gürtekin & Şekerdağ, 2008).



Şekil 4. H₂O₂ konsantrasyonunun a) KOİ ve b) Renk Giderimi Üzerine Etkisi

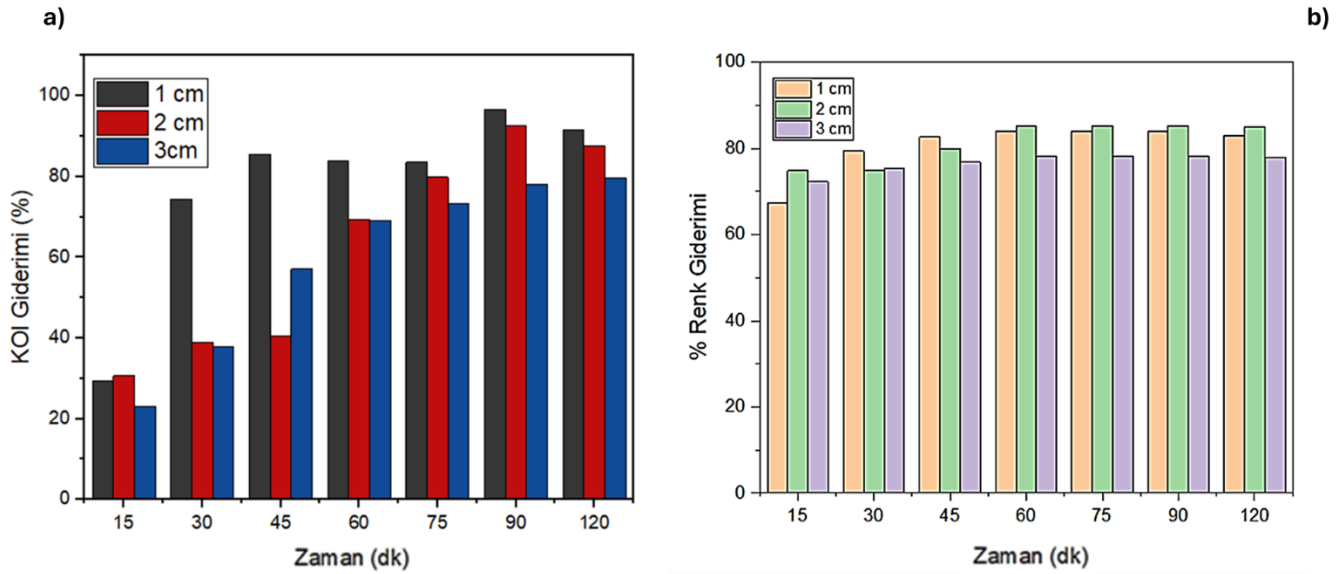
Şekil 4b'de H₂O₂ konsantrasyonu 10 mL/L'den 50 mL/L'ye artırıldığında, renk giderimi %74'ten %85'e yükselmiştir. 40 mL/L H₂O₂ konsantrasyon değeri hem KOİ hem de renk giderimi için optimum değer olarak bulunmuştur. Ayrıca, KOİ giderimi maksimum seviyesine 90. dakikada ulaşırken, renk giderimi 60. dakikada maksimum seviyesine ulaşmıştır. Bu durum rengin KOİ'den önce giderildiğini göstermektedir.

Elektrotlar Arası Mesafenin Etkisi

EF prosesinde, elektrotlar arasındaki mesafe kirleticilerin giderimini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Deneysel çalışmada EF prosesinde elektrot aralığını optimize etmek için aşağıdaki işletme koşulları seçilmiştir: pH = 3, karıştırma hızı = 200 rpm, hacim = 500 mL, V = 30 V, H₂O₂ konsantrasyonu 40 mL/L'dir. Şekil 5a'da elektrotlar arasındaki mesafenin KOİ giderim verimliliği üzerindeki etkilerini gösterilmektedir. Elektrotlar arasındaki mesafe azaldıkça, KOİ giderim verimliliği %90'ın üzerine çıkmıştır. Ancak elektrotlar arasındaki mesafe 3 cm olduğunda, KOİ giderim verimliliği %70'e düşmüştür. Elektrot mesafesi 1 cm olduğunda %90'ın üzerinde bir KOİ giderim verimliliği elde edildiğinden, optimum değer 1 cm olarak belirlenmiştir. Bu durum, elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça elektrik direncinin arttığı ve dolayısıyla çözeltinin iletkenliğinin azaldığı gerçeğiyle ilişkilendirilebilir. Bu aynı zamanda enerji tüketimini azaltarak, Fe²⁺ ve OH[•] iyonlarının üretimini azaltmaktadır. Ayrıca, elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça üretilen Fe²⁺ ve OH[•] iyonları arasındaki çarpışmaların azalması ve böylece KOİ giderim verimliliğinin düşmesi beklenmektedir. Kim vd., (2002)'nin sonuçları, elektrokimyasal süreçte elektrotlar arasındaki mesafenin 0.5 cm'den 3 cm'ye artırılmasıyla mavi disperse boya 106'nın giderim verimliliğinin %80'den %46'ya düştüğünü göstermektedir. Malakootian & Moridi, (2017)'de elektrotlar arasındaki mesafenin 1 cm'den 3 cm'ye artırılmasının, Acid Red 18 boyasının gideriminde %74'lük bir düşüşe yol açtığını gözlemlemiştir. Elde edilen sonuçlar, literatür çalışmalarıyla uyumlu görünmektedir.

Elektrotlar arası mesafesinin renk giderimi üzerindeki etkisi Şekil 5b'de gösterilmektedir. Elektrotlar arasındaki mesafenin artırılması enerji gereksinimini artırdığı için, minimum enerji tüketimini sağlamak amacıyla elektrotlar arasındaki minimum mesafeler seçilmelidir. KOİ giderimi için elektrotlar arasındaki optimal mesafe 1 cm iken, renk giderimi için optimal mesafe 2 cm olarak kabul edilmektedir. Bu durum, hidroksil radikallerinin kirleticiyle daha

kolay bağlanmasıyla açıklanabilir. Elektrotlar arasındaki 2 cm mesafede %85 renk giderimi gözlemlenmiştir. Ancak, her iki parametre için de optimum mesafe 2 cm ise, KOİ gideriminde %10'luk bir kayıp gözlemlenebilir. 1 cm mesafede, renk gideriminde ise %5'lik bir azalma gözlemlenmiştir. Renk giderimindeki kayıp tolere edilebildiği için, bu yöntem için elektrotlar arasındaki optimum mesafe 1 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Elektrotlar Arasındaki Mesafe a) KOİ ve b) Renk Giderimi Üzerine Etkisi

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çorap boyama atıksuyunun KF ve EF süreçleri ile arıtılabilirliği incelenmiştir. Çorap boyama atıksuyunun arıtılabilirliği renk ve KOİ parametreleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Her iki proseste de 120 dakikalık test süresi boyunca gerçekleştirilerek çalışma iki aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada KF oksidasyonu kullanılmış, ikinci aşamada ise EF oksidasyonu yapılmıştır. Çorap boyama atıksuyunun KF oksidasyonu ile arıtılması üzerine yapılan deneylerde Fe^{+2} miktarı (0.5, 1, 2.5 ve 5 g/L), H_2O_2 miktarı (25, 50, 100, 150 mL/L) ve zaman (15, 30, 45, 60, 75, 90 ve 120 dakika) etkileri araştırılarak Optimal koşullar belirlenmiştir. KF prosesi için 5 g/L Fe^{+2} konsantrasyonu, 100 mL/L H_2O_2 , pH=3, 45 dakika süresince yapılan deneylerde % 96 KOİ giderim verimliliği elde edilmiştir. Ayrıca, 2.5 g/L Fe^{+2} konsantrasyonunda %75 renk giderimi gözlemlenmiştir. EF prosesi için ise, voltaj (10, 20 ve 30 V), pH=3, H_2O_2 (10, 20, 30, 40 ve 50 mL/L) ve elektrotlar arasındaki mesafe (1, 2 ve 3 cm) giderim verimliliğini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. EF prosesi için optimum koşullar 30 V voltaj, pH = 3, elektrotlar arasındaki mesafe 1 cm ve H_2O_2 40 mL/L olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında maksimum KOİ giderimi %99 ve elektrotlar arasındaki 1 cm mesafede renk giderimi %85 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, çorap boyama tesisinden kaynaklanan atıksuyun düşük pH ve optimum Fe^{+2} ve H_2O_2 dozajlaması ile hem KF hem de EF oksidasyon süreçlerinde etkili arıtma verimliliğine sahip olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, endüstriyel atıksuyun arıtılması için alternatif ve etkili yöntemlerin kullanılabilirliğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde yürütülen "Çorap Boyama Fabrikası Atıksuyunun Fenton ve Elektro-Fenton Prosesleri ile Arıtılabilirliği" konulu yüksek lisans tezinden türetilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan atıksuyu temin eden Kayseri Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren KARTESK A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Alkaya, E., & Demirer, G. N. (2014). Sustainable textile production: A case study from a woven fabric manufacturing mill in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 65, 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.008>

Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6(July), 100230. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>

Ćurić, I., Dolar, D., & Karadakić, K. (2021). Textile wastewater reusability in knitted fabric washing process using

- UF membrane technology. *Journal of Cleaner Production*, 299, 126899. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126899>
- GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 191, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>
- Gürtekin, E., & Şekerdağ, N. (2008). Bir ileri oksidasyon prosesi: Fenton prosesi. *Journal of Engineering Sciences*, 14(3), 229–236.
- Karthikeyan, S., Titus, A., Gnanamani, A., Mandal, A. B., & Sekaran, G. (2011). Treatment of textile wastewater by homogeneous and heterogeneous Fenton oxidation processes. *Desalination*, 281(1), 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.019>
- Kaur, P., Kushwaha, J. P., & Sangal, V. K. (2018). Transformation products and degradation pathway of textile industry wastewater pollutants in Electro-Fenton process. *Chemosphere*, 207, 690–698. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.114>
- Kim, T. H., Park, C., Shin, E. B., & Kim, S. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150(2), 165–175. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00941-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00941-4)
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., ... Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.105012>
- Kuleyin, A., Gök, A., & Akbal, F. (2021). Treatment of textile industry wastewater by electro-Fenton process using graphite electrodes in batch and continuous mode. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104782>
- Luo, Z., Liu, M., Tang, D., Xu, Y., Ran, H., He, J., ... Sun, J. (2022). High H₂O₂ selectivity and enhanced Fe²⁺ regeneration toward an effective electro-Fenton process based on a self-doped porous biochar cathode. *Applied Catalysis B: Environmental*, 315(April), 121523. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121523>
- Malakootian, M., & Moridi, A. (2017). Efficiency of electro-Fenton process in removing Acid Red 18 dye from aqueous solutions. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.008>
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2009). Electro-Fenton degradation of synthetic dyes. *Water Research*, 43(2), 339–344. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.028>
- Paździor, K., Bilińska, L., & Ledakowicz, S. (2019). A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 376(December 2018), 120597. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.057>
- Pelalak, R., Hassani, A., Heidari, Z., & Zhou, M. (2023). State-of-the-art recent applications of layered double hydroxides (LDHs) material in Fenton-based oxidation processes for water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 474(June). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145511>
- Raja, A. S. M., Arputharaj, A., Saxena, S., & Patil, P. G. (2019). Water requirement and sustainability of textile processing industries. *Water in Textiles and Fashion: Consumption, Footprint, and Life Cycle Assessment*, 155–173. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102633-5.00009-9>
- Ramirez-Pereda, B., Álvarez-Gallegos, A., Bustos-Terrones, Y. A., Silva-Martínez, S., & Hernández-Pérez, A. (2020). Effective Electro-Fenton Treatment for a Real Textile Effluent: A Case Study. *Journal of Water Process Engineering*, 37(February). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101434>
- Ramos, M. D. N., Santana, C. S., Velloso, C. C. V., da Silva, A. H. M., Magalhães, F., & Aguiar, A. (2021). A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 366–386. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.029>
- Santana-Martínez, G., Roa-Morales, G., Del Campo, E. M., Romero, R., Frontana-Urbe, B. A., & Natividad, R. (2016). Electro-Fenton and Electro-Fenton-like with in situ electrogeneration of H₂O₂ and catalyst applied to 4-chlorophenol mineralization. *Electrochimica Acta*, 195, 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.093>

Sobczak, M., Bujnowicz, S., & Bilińska, L. (2024). Fenton and electro-Fenton treatment for industrial textile wastewater recycling. Comparison of by-products removal, biodegradability, toxicity, and re-dyeing. *Water Resources and Industry*, 31(December 2023), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100256>

Temur Ergan, B., Aydin, E. S., & Gengec, E. (2023). Improving electro-fenton degradation performance using waste biomass-derived-modified biochar electrodes: A real environment textile water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111439>

Uddin, F. (2021). Environmental hazard in textile dyeing wastewater from local textile industry. *Cellulose*, 28(17), 10715–10739. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04228-4>